УДК 621.039.52:034.5:621.039.533.4

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ

В.И. Бойко, В.В. Шидловский*, П.М. Гаврилов*, М.Г. Герасим*, И.В. Шаманин

Томский политехнический университет
E-mail: shamanin@phtd.tpu.ru
*ФГУП Сибирский химический комбинат. г. Северск

Разработана методика расчетного моделирования нейтронно-физического и теплогидравлического состояния канала водоохлаждаемого реактора с графитовым замедлителем в быстропротекающих процессах. Произведен расчет гипотетической аварийной ситуации, возникающей при отказе приводов насосов и падении давления в контуре многократной принудительной циркуляции, которое вызвано частичным разрывом трубопровода.

Введение

Технические системы большой сложности и повышенной мощности неизбежно создают определенную степень риска для человека и окружающей среды. Можно лишь сократить до минимума вероятность тяжелой аварии и стремиться уменьшить ее возможные последствия. Проектом АЭС рассматриваются возможные аварии, для которых известны гипотетические исходные события и конечное состояние. Для них создаются системы безопасности, ограничивающие последствия установленными пределами.

Расчетные пакеты прикладных программ являются основным инструментом в анализе тепловых и гидродинамических процессов канальных реакторов, в том числе при частичных разрывах контура многократной принудительной циркуляции РБМК (*реактор большой мощности канальный*). Характерной чертой исследований безопасности РБМК при авариях с потерей теплоносителя является широкое использование зарубежных пакетов прикладных программ RELAP, ATHLET и др. [1]. Они созданы применительно к анализу безопасности реакторов типа PWR (*pressured water reactor*), поэтому анализ аварийных режимов РБМК на их основе имеет свою специфику. Прежде всего, встает вопрос о возможности применения кодов в условиях, определенных особенностями канального реактора с графитовым замедлителем [2]. В кодах RELAP и ATHLET в явном виде не моделируется динамика парообразования и динамика двухфазного потока. Для PWR и ВВЭР (*водо-водяной энергетический реактор*) в этом нет необходимости. Поэтому при использовании указанных пакетов прикладных программ нет возможности определить, какой эффект превалирует – отрицательная обратная связь за счет Доплер-эффекта или положительная обратная связь, обусловленная парообразованием.

Цель работы и методика решения задачи

Целью настоящей работы являлась разработка методики расчетного моделирования нейтронно-физического и теплогидравлического состояний канала реактора в быстропротекающих процессах.

Быстропротекающие процессы в реакторах могут инициироваться нештатными ситуациями, в частности, неконтролируемыми изменениями:

- расхода и давления теплоносителя в контуре многократной принудительной циркуляции;
- реактивности и, соответственно, нейтронной мощности.

Основным принципом, используемым в методике, является явный учет обратных связей между возмущением, вносимым в систему, и откликом системы на возмущение. В качестве возмущения выступает изменение реактивности, в качестве отклика – нейтронная мощность. Она определяет теплофизическое состояние активной зоны, изменение которого, в свою очередь, обусловливает степень отклонения реактора от критического состояния, т.е. реактивность. Такая модель системы относится к классу самосогласованных-замкнутых.

Связь между реактивностью и нейтронной мощностью описывается в терминах функции линейного отклика [3].

Быстропротекающий процесс дробится во времени; в пределах каждого интервала времени путем организации итерационного процесса решается самосогласованная нейтронно- и теплофизическая задача.

На рис. 1 представлена структура модели системы и алгоритм вычислений, которые составляют основу пакета прикладных программ.

Это частный случай, поскольку обратная связь в нем образована с учетом изменения физических свойств теплоносителя – воды (пароводяной смеси).

На первом временном интервале $\Delta\tau$, начиная с t_0=0, для фиксированного стационарного уровня мощности n_0=1 отн. ед., при заданном расходе тепло-

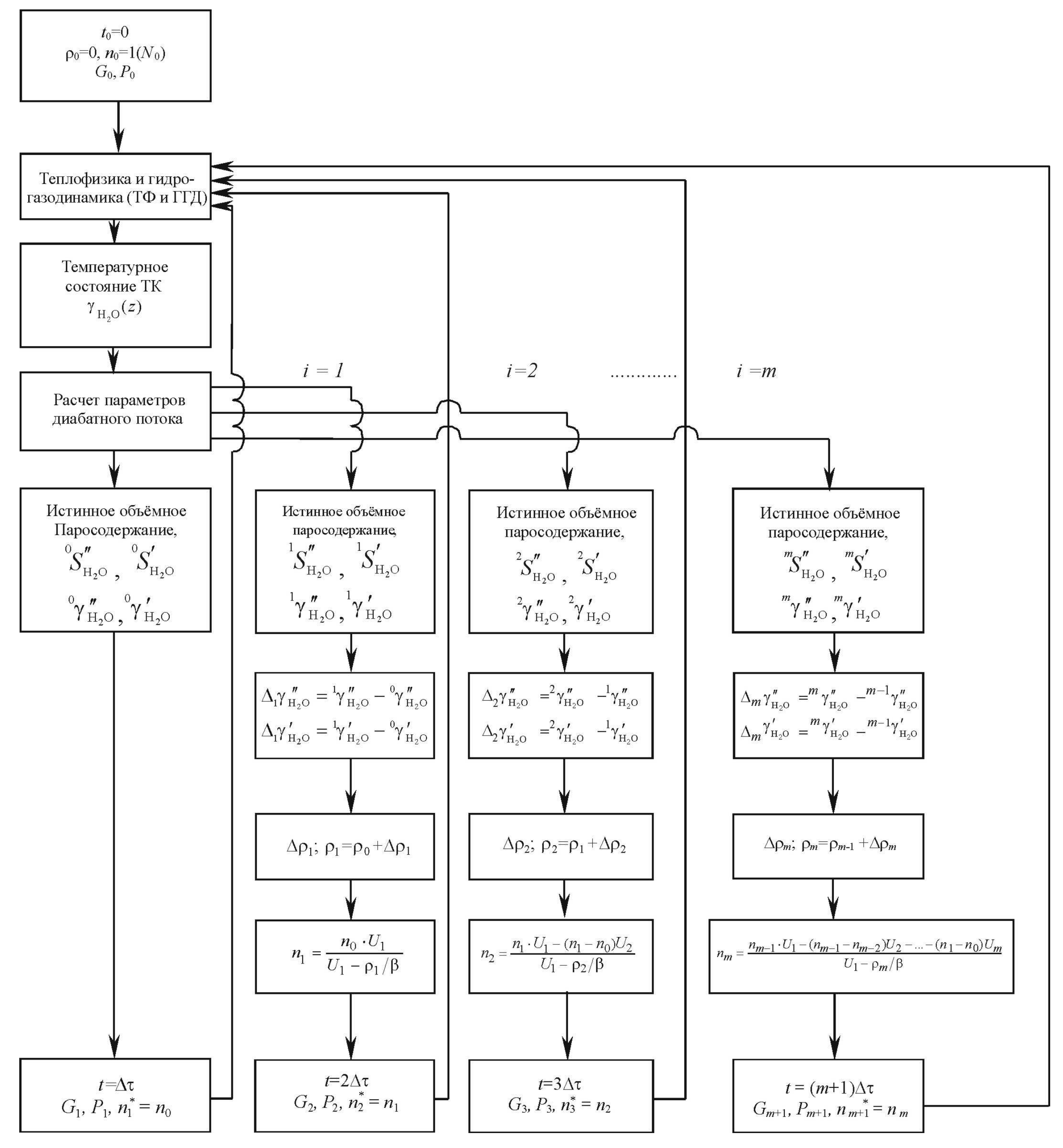


Рис. 1. *Структура модели и организация вычислений*

носителя G_0 и при неизменном давлении P_0 проводится расчет теплофизического (ТФ) и гидрогазодинамического (ГГД) состояния технологического канала (ТК). Рассчитываются изменение температуры и скорости теплоносителя при движении в ТК, коэффициенты теплоотдачи с поверхности твэла, проводится оценка критических тепловых потоков.

В результате определяется температурное состояние элементов ТК по аксиальной координате z, в т.ч. плотность потока теплоносителя (ТН) – $\gamma_{H_2O}(z)$. Затем проводится расчет параметров диабатного потока, результатом которого является значение истинного объемного паросодержания, и, следовательно:

– площади проходного сечения ТК, занятого паровой ${}^0S''_{H_2O}$ и жидкой ${}^0S'_{H_2O}$ фазами;
– плотности молекул H_2O в паровой ${}^0\gamma''_{H_2O}$ и жидкой ${}^0\gamma'_{H_2O}$ фазах.

Далее следует задание новых значений расхода и давления – G_1 и P_1. Новое значение нейтронной мощности полагается неизменным $n_1^*=n_0$. Цикл расчетов (ТФ и ГГД)$\to$ расчет параметров диабатного потока повторяется. В результате (i=1) определяются новые значения ${}^1S'_{H_2O}$, ${}^1S''_{H_2O}$, ${}^1\gamma'_{H_2O}$ и ${}^1\gamma''_{H_2O}$.

Приращения $\Delta_1\gamma'_{H_2O}$, $\Delta_1\gamma''_{H_2O}$ и изменения значений S'_{H_2O}, S''_{H_2O}, определяют значение приращения реактивности $\Delta\rho_1$.

Затем определяется «истинное» значение нейтронной мощности n_1 в формализме, использующем понятие функции линейного отклика.

Далее следует изменение расхода и давления: G_2 и P_2. Новое значение нейтронной мощности полагается неизменным $n_2^*=n_1$. Цикл расчетов [(ТФ и ГГД)$\to$ расчет параметров диабатного потока] повторяется. В результате (i=2) определяются новые значения ${}^2S'_{H_2O}$, ${}^2S''_{H_2O}$, ${}^2\gamma'_{H_2O}$ и ${}^2\gamma''_{H_2O}$ и следует нейтронно-физический расчет.

Начиная с i=1 последовательность вычислений остаётся неизменной и повторяется. Результатом вычислений является динамика нейтронно-физических и теплогидравлических параметров ТК.

Последовательность вычислений при определении параметров диабатного потока

Расчет по соотношениям, которые используются при определении параметров диабатного потока [4], проводится в последовательности, изложенной ниже.

В соотношениях приняты следующие обозначения: p – давление, МПа; t – температура, °С; G – массовый расход, кг/с; F – проходное сечение, м^2; d – диаметр твэла, мм; q_s – плотность теплового потока, МВт/м^2; $(\rho\omega)=G/F$ – массовая скорость, кг/м^2·с.

Из подпрограмм-таблиц по заданным p и t определяются: r – удельная теплота парообразования (теплота испарения), Дж/кг; h – удельная энтальпия потока, Дж/кг; h' – для жидкой фазы, Дж/кг; h'' – для паровой фазы, Дж/кг; v – удельный объём потока, м^3/кг; v' – для жидкой фазы, м^3/кг; $\rho'=1/v'$ – плотность жидкой фазы, кг/м^3; v'' – для паровой фазы, м^3/кг; $\rho''=1/v''$ – плотность паровой фазы, кг/м^3; ν' – коэффициент кинематической вязкости для жидкой фазы, м^2/с; для заданной t определяется $p_{кр}$ – критическое давление, МПа. Затем проводятся вычисления:

1) $\omega_0=\rho\omega/\rho'$ – скорость циркуляции;
2) $\pi=p/p_{кр}$;
3) коэффициент скольжения:
$$s=1+2{,}27(1-\pi^2)(\rho'/\rho\omega)^{0,7};$$
4) средняя энтальпия потока в точке начала интенсивного роста истинного объёмного паросодержания:
$$h_0=h'-\frac{q_s}{\rho\omega}\cdot 7{,}5\left(\frac{gd}{r\rho''v'}\right)^{0,08}\cdot\left(\frac{\omega_0 d}{\nu'}\right)^{0,2};$$
5) $$\Delta h=(h+h'-2h_0)\exp\left(-2\frac{h-h_0}{h'-h_0}\right);$$
6) массовое расходное паросодержание:
$$x=(h-h'+\Delta h)/(r+\Delta h);$$
7) граничное значение истинного объёмного паросодержания:
$$\varphi_p=(1+0{,}333s)^{-1};$$
8) граничное значение массового расходного паросодержания:
$$x_p=(1+0{,}333\rho'/\rho'')^{-1};$$
9) $$\varphi_0=1{,}17q^{0,35}/p^{0,15}(\rho\omega)^{0,15};$$
10) $$x_0=-0{,}537q^{0,7}(p/\rho\omega)^{0,3};$$

Истинное объёмное паросодержание потока φ:

11) $\varphi=0$ при $x<x_0$ (п. 6, п. 10),
$$\varphi=\varphi_0(1-x/x_0)^{1,35}\quad\text{при}\quad x_0<x<0,$$
$$\varphi=\varphi_0+\frac{x}{x_p}(\varphi_p-\varphi_0)\quad\text{при}\quad 0<x<x_p,$$
$$\varphi=\varphi_p\quad\text{при}\quad x>x_p.$$

Площадь проходного сечения ТК, занятого паровой фазой – $S''_{H_2O}=\varphi F$, занятого жидкой фазой – $S'_{H_2O}=F-S''_{H_2O}$.

Расчет отклика нейтронной мощности на возмущение реактивности

Выражения для концентрации ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i-ой группы при:

τ=0 $$\bar{C}_{i,0}=\frac{\beta_i}{\beta}\cdot\frac{n_0}{\lambda_i}=a_i\cdot\frac{n_0}{\lambda_i};\qquad(1)$$

$0<\tau\le\Delta\tau$ $$\bar{C}_i=\frac{a_i n}{\lambda_i}-\frac{\Delta n}{\Delta\tau}\cdot\frac{a_i(1-e^{-\lambda_i\tau})}{\lambda_i^2};\qquad(2)$$

$\tau>\Delta\tau$ $$C_i=\frac{a_i n_1}{\lambda_i}-\frac{\Delta n}{\Delta\tau}\cdot\frac{a_i(1-e^{-\lambda_i\Delta\tau})}{\lambda_i^2}\cdot e^{-(\tau-\Delta\tau)\lambda_i}.\qquad(3)$$

Здесь $a_i=\beta_i/\beta$ – относительный выход запаздывающих нейтронов по группам; $\Delta n=n_1-n_0$ – изменение мощности за время $\Delta\tau$.

Функция линейного отклика

Подстановка выражений (1–3) в $\bar{\rho}=1-\sum_i \frac{\overline{C_i}\lambda_i}{n}$ позволяет получить следующее выражение для изменения реактивности при заданном законе изменения мощности:

$$\bar{\rho}=\frac{\Delta n}{n(\tau)}\cdot U_{\Delta\tau}(\tau).$$

При указанной подстановке учтено, что

$$\sum_{i=1}^{6} a_i=1.$$

Функция $U_{\Delta\tau}(\tau)$ называется функцией линейного отклика [3].

Эта функция задается следующими соотношениями при:

$$0\le\tau\le\Delta\tau \qquad U_{\Delta\tau}(\tau)=\sum_{i=1}^{6}\frac{a_i(1-e^{-\lambda_i\tau})}{\lambda_i\Delta\tau};$$

$$\tau>\Delta\tau \qquad U_{\Delta\tau}(\tau)=\sum_{i=1}^{6}\frac{a_i(1-e^{-\lambda_i\Delta\tau})}{\lambda_i\Delta\tau}\cdot e^{-\lambda_i(\tau-\Delta\tau)}.$$

Из (3) получаем следующее значение конечного уровня мощности реактора n_1, которое достигается после ввода реактивности $\bar{\rho}$ за время $\Delta\tau$

$$n_1=\frac{n_0}{1\pm\dfrac{\bar{\rho}}{U_{\Delta\tau}(\Delta\tau)}}.$$

В нашем случае возмущение реактивности обусловлено изменением значения истинного объёмного паросодержания (изменением концентрации молекул воды)

$$\Delta\rho=\Delta n_{\mathrm{H_2O}}\cdot\left(\frac{d\rho}{dn_{\mathrm{H_2O}}}\right).$$

Для реактора с отражателем необходимо учитывать «эффективные добавки» за счёт отражателя. В этом случае, при расчёте геометрического параметра, фактические полуразмеры зоны увеличиваются на величину эффективной добавки δ: $H'=H+2\delta$; $R'=R+\delta$.

Для уран-графитовых реакторов с графитовым отражателем

$$\delta=1{,}2L_{отр}\,\mathrm{th}\frac{T}{L_{отр}},$$

где $L_{отр}$ – длина диффузии в отражателе (графите), $L_{отр}$=57 см, T – толщина отражателя, см.

Для реактора РБМК-1000 толщина отражателей: бокового – 75 см; верхнего и нижнего – 50 см.

$$\tau=\tau_{\mathrm{C}}\left(\frac{S_{яч}}{S_{яч}-S_{тк}}\right)^2,$$

где $S_{тк}=S_{\mathrm{H_2O}}+S_{км}$, τ_C=312,5 см^2 – возраст нейтронов в графите, $S_{яч}$, $S_{тк}$ – площади поперечного сечения ячейки и ТК, $S_{км}$ – конструкционных элементов ТК, $S_{\mathrm{H_2O}}$ – проходного сечения под пароводяную смесь.

Вероятность избежать резонансного захвата определяется соотношением:

$$\varphi=\exp\left[-\frac{(k_T R_U\sqrt{R}\,n\varepsilon_1+0{,}73\cdot nR_U^2\varepsilon_1)}{(\xi\sum_{S3}S_3+\xi\sum_{S\Phi}S_\Phi)}\right],$$

где $\xi\Sigma_{S3}$ и $\xi\Sigma_{S\Phi}$ – замедляющая способность замедлителя и «фиктивного блока»; S_3 и S_Φ – площадь замедлителя и фиктивного блока; R_U – радиус уранового блока; k_T – температурный коэффициент; n – число стержней в пучке; R – радиус пучка; ε_1 – пористость блока по урану-238. Коэффициент k_T имеет вид:

$$k_T=0{,}775(1+17{,}5\cdot10^{-3}\sqrt{T_U}),$$

где R_U – средняя температура урана, K.

Изменение концентрации молекул воды наиболее сильно влияет на коэффициент использования тепловых нейтронов θ, поэтому при дифференцировании формулы четырех сомножителей считаем остальные сомножители константами:

$$\rho=1-\frac{1+L^2B^2}{\eta\varepsilon\varphi\theta\cdot\exp(-B^2\tau)},$$

$$\rho'=\left(-\frac{1}{\eta\varepsilon\varphi\cdot\exp(-B^2\tau)}\right)\cdot\left(\frac{1+L^2B^2}{\theta}\right)=$$

$$=\left(-\frac{1}{\eta\varepsilon\varphi\cdot\exp(-B^2\tau)}\right)\cdot\left(-\frac{\theta'}{\theta^2}(1+L^2B^2)\right),$$

$$\frac{d\rho}{dn_{\mathrm{H_2O}}}=\frac{d\theta}{dn_{\mathrm{H_2O}}}\cdot\frac{1+L^2B^2}{\theta^2\eta\varepsilon\varphi\cdot\exp(-B^2\tau)}. \qquad (4)$$

Дифференцируем выражение для определения коэффициента использования тепловых нейтронов:

$$\theta=\frac{\Sigma_a^{топл}}{\Sigma_a^{яч}}=\frac{\Sigma_a^{топл}}{\Sigma_a^{\mathrm{Zr}}+\Sigma_a^{\mathrm{Nb}}+\Sigma_a^{\mathrm{C}}+\Sigma_a^{\mathrm{H_2O}}+\Sigma_a^{топл}},$$

$$\frac{d\theta}{dn_{\mathrm{H_2O}}}=\sum\nolimits_a^{топл}\left(-\frac{\sigma_a^{\mathrm{H_2O}}}{(\sum_a^{\mathrm{Zr}}+\sum_a^{\mathrm{Nb}}+\sum_a^{\mathrm{C}}+\sum_a^{\mathrm{H_2O}}+\sum_a^{топл})^2}\right).$$

При расчете по соотношению (4) значения θ и $\frac{d\theta}{dn_{\mathrm{H_2O}}}$ определяются для $\Sigma_a^{\mathrm{H_2O}}$, которое вычисляется по формуле:

$$(\Sigma_a^{\mathrm{H_2O}})=(\Sigma_a^{\mathrm{H_2O}})^*\frac{S''_{\mathrm{H_2O}}\cdot\gamma''_{\mathrm{H_2O}}+S'_{\mathrm{H_2O}}\gamma'_{\mathrm{H_2O}}}{S_{\mathrm{H_2O}}\cdot\gamma_{\mathrm{H_2O}}},$$

где $(\Sigma_a^{\mathrm{H_2O}})^*$ – макроскопическое сечение поглощения в пароводяной смеси (в воде) на предыдущем шаге интегрирования по времени. Для воды $\Sigma_a=\frac{\gamma_{\mathrm{H_2O}}}{\gamma_{\mathrm{H_2O}}^{\text{н.у.}}}\cdot0{,}0221$, см$^{-1}$, где $\gamma_{\mathrm{H_2O}}^{\text{н.у.}}$ – плотность воды в нормальных условиях, $\gamma_{\mathrm{H_2O}}$ – при текущих значениях температуры и давления.

Результаты расчетов и их обсуждение

В расчетах моделировалась гипотетическая аварийная ситуация, возникающая при отказе приводов насосов и падении давления в контуре многократной принудительной циркуляции, которое вызвано частичным разрывом трубопровода.

Динамика теплового состояния технологического канала приведена на рис. 2.

Расход теплоносителя за 1,8 с уменьшается в 1,3 раза, и в этот момент возникают условия, необходимые для инициации местного кипения на наиболее энергонапряженном участке ТК. Температура поверхности твэла достигает 350 °C, превышая температуру насыщения на 65 °C. За следующие 0,5 с возникают условия, необходимые для объемного кипения. В случае, если паросодержание достигает граничного значения, наступает кризис теплообмена 2-ого рода: жидкая пленка высыхает, вся выделяющаяся энергия идет на разогрев твэла, в том числе – его оболочки. Это иллюстрируется ходом зависимости температуры поверхности твэла от времени (рис. 2, зависимость 5). Температура теплоносителя достигает температуры насыщения и далее не изменяется. Нейтронная мощность стремительно нарастает, и через 2,5 с после начала падения расхода теплоносителя плотность теплового потока достигает критического значения. Начиная с этого момента времени очень вероятно стремительное нарастание температуры оболочки твэла и, как следствие, ее разрушение.

С учетом срабатывания аварийной защиты динамика процесса следующая. Время возрастания мощности составляет 1,5...2,0 с. Нейтронная мощность сначала, вслед за ростом паросодержания, возрастает до 115 % номинального значения. После срабатывания защиты она быстро снижается до уровня остаточного тепловыделения.

Результаты расчетов [5] показывают, что с учетом того, что около 20 % запасенного в твэле тепла расходуется на прогрев оболочки, ее температура при адиабатическом выравнивании профиля температуры может превысить 1100 °C. Это значение характеризует температуру, которая может быть достигнута в авариях рассматриваемого типа.

Оценка неопределенностей результатов, полученных в расчетах, позволяет определить ключевые процессы и явления в канале водоохлаждаемого реактора.

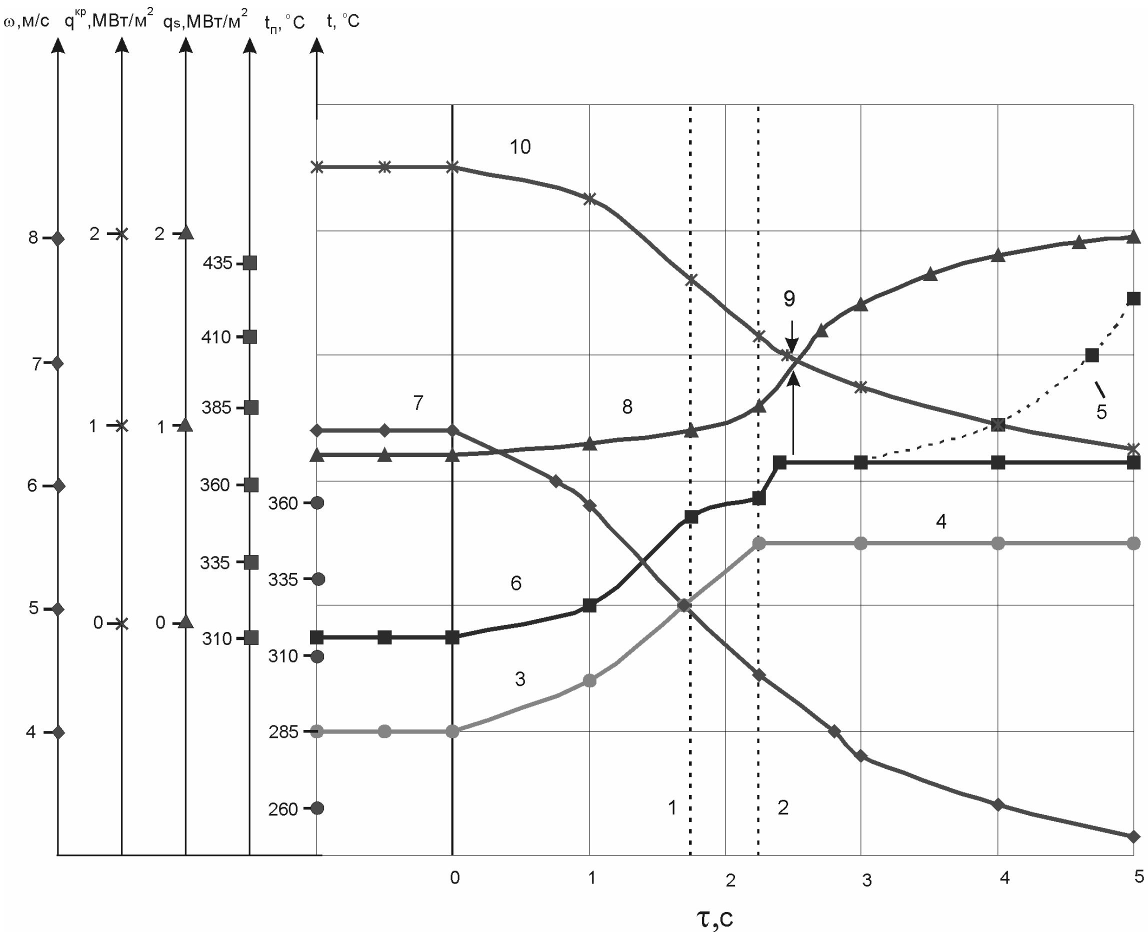


Рис. 2. Динамика теплового состояния технологического канала: 1) начало местного кипения; 2) начало объёмного кипения; 3) t – температура потока; 4) t_s – температура насыщения; 5) возможный рост $t_п$; 6) $t_п$ – температура поверхности твэла; 7) ω – скорость потока; 8) q_s – плотность теплового потока; 9) возможность начала кризиса теплообмена; 10) $q_{кр}$ – критическая тепловая нагрузка

Ими следует считать:

- запасенное тепло в ядерном топливе;
- термодинамическое состояние системы и, в первую очередь – особенности течения двухфазного потока, вызывающие колебания расхода теплоносителя и условий теплообмена на поверхности твэла.

Определяющими параметрами при моделировании процесса отвода тепла, запасенного в топливе, являются:

- термическое сопротивление зазора между топливом и оболочкой;
- коэффициент неравномерности энерговыделения;
- теплопроводность топлива и коэффициент теплоотдачи с поверхности твэлов.

Для условий канального водоохлаждаемого реактора с графитовым замедлителем (РБМК, АДЭ – аппарат двухцелевой энергетический) присутствие воды в нормальном режиме эксплуатации лишь занижает значение коэффициента использования тепловых нейтронов. Образование устойчивого диабатного потока приводит к резкому возрастанию реактивности и, следовательно, нейтронной мощности. Проведенный расчетный анализ совокупности нейтронно- и теплофизических процессов показывает, что обратная положительная связь «по пару» оказывается гораздо более сильной и динамичной, чем отрицательная обратная связь «по Допплер-эффекту».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Достов А.И. Исследование на основе программы RELAP4/MOD6 аварийных процессов в реакторах РБМК при частичных разрывах раздаточного группового и напорного коллекторов. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, инв. № 33Р/1–477–89, 1989.
2. Гаврилов П.М. Эволюция уравнения Рэлея в задаче с фазовым переходом // Теплофизика высоких температур. – 2001. – Т. 39. – № 2. – С. 311–315.
3. Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.
4. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. Под общей ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
5. Достов А.И., Крамеров А.Я. Исследование безопасности РБМК при авариях, инициируемых частичными разрывами контура циркуляции // Атомная энергия. – 2002. – Т. 91. – № 1. – С. 23–30.

УДК 378:001.891